

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOSAS PARA PUENTES DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

Felipe J. Acosta¹ y Abdul-Hamid Zureick²

RESUMEN: En este trabajo se presenta la determinación experimental de las propiedades mecánicas y estructurales de una losa para puentes construida con Polímeros Reforzados con Fibras (PRF), específicamente resina vinil éster reforzada con fibras de vidrio de tipo E (E-glass). Las fibras se utilizaron en forma de tela cosida en dos dimensiones (NCF) y, por primera vez, un trenzado en tres dimensiones. La losa está construida adhiriendo vigas con sección triangular y dos placas planas que forman las superficies superior e inferior del panel. El material se caracterizó primero al nivel de especímenes de tamaño cupón, donde se determinaron sus propiedades físicas y mecánicas. Las propiedades estructurales de las vigas se determinaron por medio de pruebas en flexión donde se utilizó un arreglo de tres potenciómetros para medir simultáneamente deflexiones verticales y laterales y rotación, incluyendo el uso de un simulador de carga gravitatoria. Por último, las propiedades en flexión del panel fueron determinadas ensayando cuatro prototipos de las losas del ancho de cinco celdas. Se encontró alta variabilidad en el material reforzado con el trenzado 3-D pero éste se utilizó para reforzar las vigas en el prototipo final. Los prototipos soportaron 5.5 veces la carga de diseño, por lo que se concluyó que el diseño de estos sistemas está dominado por límite de deflexiones y no por capacidad resistente. Se recomendó que se desarrollen metodologías de diseño donde se calibren los modelos de diseño con data experimental y valores de variabilidad en el material utilizando metodologías de confiabilidad.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que los puentes tienen una vida útil promedio de 68 años, las losas duran sólo 35 años. Basado en el artículo de Bettigole (1990), el 40% de los puentes en los Estados Unidos han o alcanzarán la edad de 35 años a partir de la presente década, por lo que requerirán algún tipo de reparación. Esto equivaldrá a interrumpir el 40% de las ya congestionadas vías de tránsito. Por esta razón, es necesario explorar nuevas tecnologías que minimicen el impacto a estos sistemas de tránsito tan necesarios. Las losas de puentes de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) proveen una alternativa muy atractiva para la rehabilitación de puentes o en la construcción de nuevas estructuras. Este tema ha sido objeto de gran interés en los últimos años. Estos sistemas son atractivos debido a que sus propiedades son superiores a las de otros materiales comúnmente utilizados, especialmente su alta razón de capacidad-a-peso, su resistencia a la corrosión, la buena respuesta a fatiga, y el rápido ensamblaje en el campo debido a su construcción modular. Sin embargo, el uso de estos sistemas innovadores no solo ha sido limitado por los altos costos de producción, sino por la cantidad limitada de datos relevantes para la predicción del comportamiento utilizando herramientas analíticas que incluyan las propiedades anisótropas del material.

La investigación relacionada al tema de losas para puentes fabricadas de PRF comenzó hace aproximadamente 18 años. La primera revisión de literatura sobre el tema fue publicada por Zureick y otros (1995). Desde entonces, otros artículos e informes han sido publicados en la literatura. Shih (1995) estudió cuatro configuraciones diferentes de losas para puentes, mostradas en la Figura 1, sujetas a condiciones de carga equivalentes a un camión de AASHTO HS20-44 y fueron analizadas utilizando la técnica de los elementos finitos combinada con un algoritmo de optimización. Este estudio concluyó que el panel con sección V fue la más eficiente para una alta gama de condiciones de apoyo desde 1.22 m hasta 3.66 m. También fueron propuestos espesores de las diferentes partes y la arquitectura del refuerzo de fibra para satisfacer la capacidad y los criterios de servicio.

Karbahri (1997) presentó resultados de pruebas experimentales de ocho configuraciones diferentes de losas para puentes fabricadas por varios manufactureros utilizando las técnicas de estratificación manual (hand lay-up), pultrusión (pultrusion), e infusión de resina (resin infusion). Los prototipos ensayados eran de diferentes largos desde 1.22 m hasta 3.66 m, mientras que el espesor de las muestras era de 20.3 cm. Los resultados fueron comparados con una losa de control de hormigón reforzado con acero. Los autores mostraron que las rigideces de cada losa se encontraban entre los valores representando la losa de hormigón agrietada y sin agrietar. La capacidad de todos los especímenes fue mucho mayor a la de la losa de control.

¹Catedrático Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, P.O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041, fjacosta@ce.uprm.edu.

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, abdul.zureick@ce.gatech.edu.

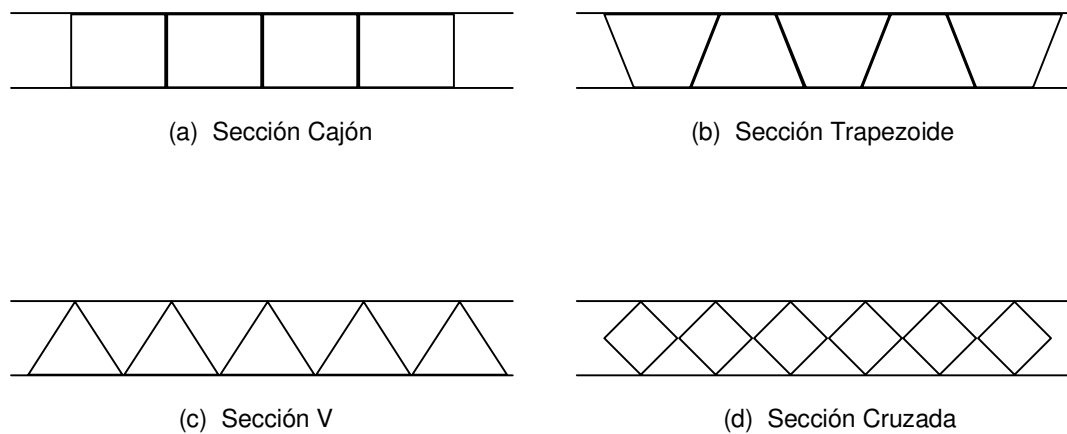


Figura 1: Sección Transversal de Losas para Puentes de PRF Estudiadas por Shih (1995)

López-Anido y otros (1997a, 1997b) reportaron trabajo experimental en una losa de PRF para puentes celulares (cellular FRP Bridge Deck). La sección estaba compuesta de tubos hexagonales y trapezoidales manufacturados por la técnica de pultrusión pegados entre sí por adhesivo y remaches (Figura 2). Esta forma de construcción del panel no permitió la continuidad del refuerzo a través de la dirección transversal, contando solamente con el adhesivo y los remaches. Los materiales utilizados consistieron en una matriz de resina vinil éster (vinylester) reforzada con fibra de vidrio del tipo E en forma de tela triaxial cocida (triaxial stitched fabric) [$\pm 45/90$] y esterilla de hebras cortadas (chopped strand mats) conocidas por sus siglas en inglés como CSM. El prototipo ensayado era de 1.14 m de ancho, simplemente apoyado a 2.74 m, cargado al centro en un caso por una carga distribuida en un área de 25 cm por 51 cm y en otro caso por una carga lineal para un total de fuerza de 400 kN. Las deflexiones y deformaciones fueron medidas en varios lugares en la parte superior e inferior del panel. Utilizaron elementos finitos para predecir las deflexiones y deformaciones unitarias. De acuerdo con los autores, las deflexiones estimadas estaban entre el 4% y el 9% de las medidas experimentalmente. El valor reportado de la rigidez en flexión ($D_{xx} = \frac{E_{a,x} I_y}{w_d}$) fue 8,420 kN-m²/m. López-

Anido y otros (1997), y López-Anido, y Gangarao (1997) presentaron un resumen de la preparación e instalación del (H-deck) en dos rutas secundarias en el estado de West Virginia en los Estados Unidos. Las losas fueron conectadas a las vigas utilizando una pultrusión de losas y sujetadores vigas (slit fasteners). Una capa de mortero polimerizado fue aplicada en la superficie de rodaje de las losas.

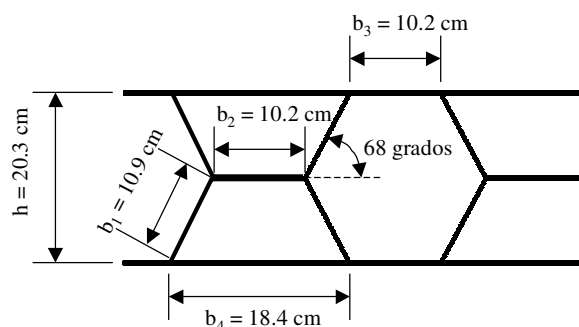


Figura 2: Configuración de la Sección Transversal de la Losa para Puentes de la Universidad de West Virginia. Reproducido de López-Anido y otros (1997a).

En este trabajo se informa sobre la caracterización experimental y analítica de las propiedades físicas y mecánicas de varios prototipos de losas para puentes de tipo celular (Cellular Bridge Decks) hechas de materiales compuestos, específicamente de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF). Este artículo presenta la primera parte de este estudio donde se presenta la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del material. Se determinó el peso específico del PRF y su contenido de fibra. Las propiedades mecánicas incluyendo la capacidad, el módulo elástico y la razón de Poisson fueron medidos haciendo ensayos de tensión y compresión de especímenes de tamaño cupón. Se determinaron las propiedades estructurales de cinco prototipos a escala real de las vigas triangulares, las cuales forman la parte interna de la losa. Por último, las propiedades estructurales de cuatro prototipos de losas de puentes del ancho de cinco celdas

fueron determinadas experimentalmente.

DESCRIPCIÓN DEL PANEL Y REFUERZOS

Basado en el trabajo de Shih (1995), se seleccionó una losa para puentes con sección V y espesor nominal de 23 cm cuya configuración se ilustra en la Figura 3. Para esta losa, las placas planas que forman las superficies superior e inferior fueron manufacturadas por la técnica de estratificación manual (hand lay-up) utilizando una matriz de resina de vinil éster reforzada con fibra de vidrio de tipo E formada en telas cosidas cuadriaxiales en dos direcciones (2-D quadriaxial stitched fabric), también conocidas por su nombre en inglés como NCF. Las vigas de sección triangular fueron en un caso manufacturadas con los mismos materiales y por la misma técnica que las placas planas. En otro caso, estas vigas fueron manufacturadas por la técnica de pultrusión utilizando una matriz de resina vinil éster reforzada con fibras de tipo E formadas en un trenzado triaxial en tres dimensiones (3-D triaxial braided preform). Todos los componentes fueron ensamblados utilizando varios adhesivos epoxy.

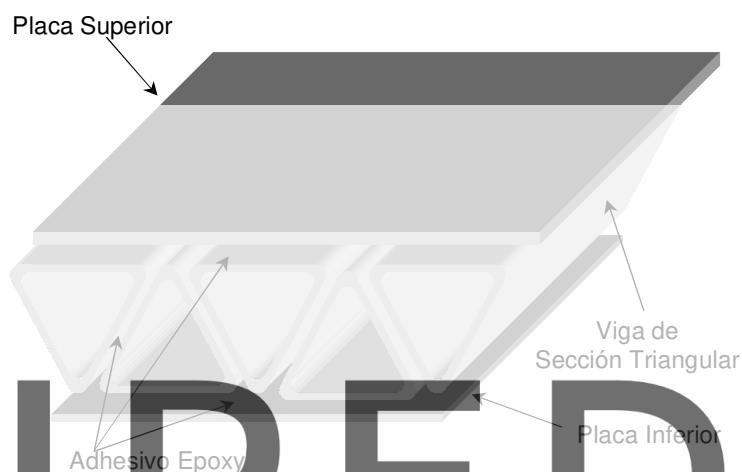


Figura 3: Configuración de la Losa de Puente de PRF

La Figura 4 muestra una representación esquemática del refuerzo NCF producida por una compañía determinada (COTECH®). Las fibras han sido orientadas en un plano x-y, donde la dirección 0° es paralela al eje de x. Estas fibras son cosidas en la dirección perpendicular al eje x-y, pero esto representa de una manera simplificada el proceso de manufactura de este refuerzo junto con datos experimentales comparando las propiedades mecánicas con telas tejidas (woven) fue presentado por Hogg y Woolstencroft (1991) y por Hörsting y otros (1993). La Tabla 1 muestra las especificaciones de los dos tipos de NCF. Detalles del refuerzo de cada uno de los componentes del panel que fueron reforzados con NCF se han resumido en la Tabla 2. Hay que resaltar que se encontró que el refuerzo de estas placas no fue colocado de forma simétrica. Esto induce acoplamiento de deformaciones axial y flectoras pero el material fue homogenizado colocando una cantidad alta de sub-laminas. Se estudiaron dos versiones de las placas superior e inferior manufacturadas por compañías distintas las cuales se agruparon como grupos A y B.

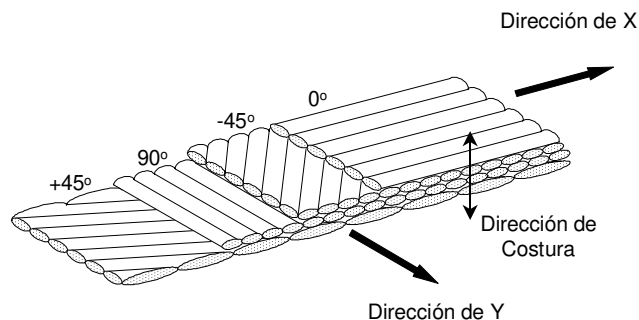


Figura 4: Representación Esquemática de una tela de Fibra de Vidrio 2-D Cuadriaxial (Quadriaxial)

Tabla 1: Especificaciones de las Telas de Fibras COTECH®.

Nombre de la Tela	Peso por Unidad de Área gr/m ² (oz/yd ²)	Orientación con Respecto a la Dirección en x (Grados)	Distribución de Peso Total (%)
EQX 4500	1532 (45.18)	0	29.24
		- 45	13.88
		90	42.50
		+ 45	13.88
EQX 2900	989 (29.16)	0	21.95
		- 45	18.74
		90	39.50
		+ 45	18.74

Tabla 2: Detalle del Refuerzo de los Componentes Reforzados con NCF.

Componente	Refuerzo	Número de Capas	Espesor Nominal
Placa Superior	EQX 4500	13	19 mm
Placa Inferior	EQX 2900	4	5 mm
Vigas Triangulares	EQX 2900	6	7 mm

La Figura 5 muestra un esquema de la distribución del refuerzo de las vigas manufacturadas por la técnica de pultrusión reforzadas con el trenzado 3-D (3-D braid). También en la figura se muestran los pesos respectivos de cada parte del refuerzo. Las paredes de estas vigas tenían un espesor nominal de 6 mm. A pesar de que el refuerzo principal fue el trenzado, también se utilizaron mazos de roving (roving bundles) y capas de CSM en las superficies exteriores. Las distribuciones por peso de las diferentes formas de fibras están resumidas en la Tabla 3. El refuerzo trenzado tiene las ventajas de ser fabricado casi en su forma final de uso, las fibras son colocadas de forma automática y rápida, controlado el proceso por computadora. Brown (1992) presentó detalles sobre la producción de este refuerzo. Las ventajas que tiene este proceso comparado con los laminados en 2-D son la eliminación del uso de capas, haciendo el material resistente a delaminación. También aumenta la capacidad a impacto. La tela trenzada está formada por seis filas por 96 columnas de hilazas fijas (fixed yarn) y por siete filas y 96 columnas de hilazas movibles (movable yarns). Las hilazas movibles tienen una proyección horizontal de +70° con referencia a las hilazas fijas.

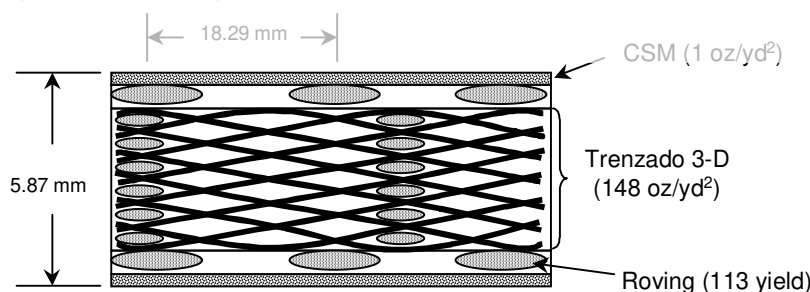


Figura 5: Arreglo del Refuerzo 3-D en las Vigas de Sección Triangular

Tabla 3: Distribución de las Fibras en las Vigas Triangulares Manufacturadas por Pultrusión.

Tipo de Refuerzo	Peso por Unidad de Área oz/yd ²	Fracción de Peso %
Trenzado 3-D	148	90.3
Roving	14	8.5
CSM	2	1.2
Total	164	100

PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL

Para poder predecir las propiedades mecánicas y verificar si el material fue construido adecuadamente, se midió su densidad y contenido de fibra. La densidad de todos los componentes fue medido utilizando la técnica de Arquímedes discutida en la norma ASTM D792. La Tabla 4 muestra un resumen de los valores promedios obtenidos. La densidad máxima obtenida (1.89 gr/cm^3) constituye una cuarta parte de la densidad de acero (7.85 gr/cm^3).

Tabla 4: Resumen de los Pesos Unitarios de los Diferentes Componentes del Panel.

Localidad	Número de Muestras	Tamaño de Muestras (mm) x (mm)	Peso Unitario gr/cm^3
Placa Superior A	6	38 x 38	1.67
Placa Superior B	3	30 x 33	1.77
Placa Inferior A	6	38 x 38	1.65
Placa Inferior B	3	25 x 25	1.82
Viga (NCF)	12	38 x 38	1.67
Viga (Trenzado 3-D)	9	32 x 32	1.89

El contenido de fibras de los componentes reforzados con NCF fue medido en un laboratorio externo siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D3171. El contenido de fibra de las vigas reforzadas con el trenzado 3-D fue medido siguiendo los procedimientos descritos por Ye y otros (1995). El resumen del contenido de las fracciones volumétricas de fibras (fiber volume fraction) (v_f) en los componentes del panel está presentado en la Tabla 5. Se obtuvo mayor contenido de fibra en las vigas reforzadas con el trenzado 3-D (47 %) debido al método de manufactura utilizado. Laminados creados a mano no permiten obtener contenidos de fibras muy altos como el método de pultrusión.

Tabla 5: Resumen del Contenido de Fibras de los Componentes del Panel.

Localidad	Número de Muestras	v_f (%)
Placa Superior A	3	36.51
Placa Inferior A	3	33.50
Viga 1 (NCF)	3	28.08
Viga 2 (NCF)	3	33.54
Viga 3 (NCF)	3	32.34
Viga (trenzado 3-D)	9	46.70

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL

Se realizaron pruebas de tensión y compresión siguiendo como guía las normas ASTM D3039 y ASTM D3410. Las muestras de tamaño cupón fueron ensayadas paralelas a los ejes de X y Y para obtener los valores de módulos elásticos (E_x , E_y), las razones de Poisson (ν_{xy} , ν_{yx}), y los esfuerzos máximos (σ_x , σ_y). Los ensayos se realizaron a modo de control de desplazamiento. La razón de carga de cada grupo de cupones se determinó individualmente a fin de obtener falla entre 3 a 5 minutos luego de comenzada cada prueba.

De la Tabla 6 a la Tabla 9 se presentan los resúmenes de las propiedades mecánicas obtenidas para los materiales reforzados con NCF. Los valores representan el promedio de los cupones ensayados. También se presentan los valores de los coeficientes de variación (CV), los cuales indican el grado de dispersión de las muestras. Hay que notar que la capacidad del material de la capa superior no fue reportado pues excedió la capacidad de la máquina de prueba por lo que no se pudo medir. El módulo elástico y la razón de Poisson fueron obtenidos por medio de una regresión lineal de la respuestas de esfuerzo-deformación entre los valores de deformación unitaria de 0.1% a 0.3%. El comportamiento de este material fue principalmente lineal y la falla se caracterizó por rompimiento de las fibras y delaminación de las capas.

Es importante señalar que estos resultados no cumplen con la relación $\nu_{xy}E_y = \nu_{yx}E_x$ válida para materiales ortótropos. Esto se debe a que los valores medidos son un promedio de varios especímenes, el material tiene defectos, la misma muestra no es ensayada en X y en Y, la deformación fue medida en la superficie del material y existen errores en los medidores de deformación.

A pesar de que las muestras de las vigas reforzadas con el trenzado 3-D se basaron en las normas de ASTM, se siguieron las recomendaciones de Masters y Portanova (1996) para la selección del ancho de los cupones. El ancho de cupones de materiales reforzados con este tipo de tela debe estar basado en las dimensiones de la celda unitaria. Cupones de 32 mm de ancho eran suficientes para tener al menos dos celdas unitarias. Observaciones del material según manufacturado reveló que los mazos de roving no estaban uniformemente distribuidos, por lo que se ensayaron cupones en tensión en la dirección de X de anchos de 25 mm, 32 mm y 51 mm para estudiar el efecto del ancho en la variabilidad de los resultados. Para los cupones ensayados en tensión en la dirección de Y y para los cupones ensayados en

compresión en ambos ejes se utilizó un ancho de 32 mm. También se utilizaron dos largos de medidores de deformaciones unitarias (strain gauges) en los cupones ensayados en tensión en la dirección de Y para estudiar su efecto en las propiedades calculadas.

Tabla 6: Resumen de Propiedades Mecánicas en Tensión en Dirección de X del Material Reforzado con NCF.

Muestra	Número de Muestras	σ_x^t		E_x^t		ν_{xy}^t	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
Placa Superior A	5	---	---	15.4	0.9	0.190	7.8
Placa Superior B	5	---	---	18.4	1.1	---	---
Placa Inferior A	5	203.9	5.4	12.7	1.3	0.225	7.7
Placa Inferior B	---	---	---	---	---	---	---
Viga (NCF) Lado 1	5	188.9	17.0	15.2	7.6	0.223	18.1
Viga (NCF) Lado 2	5	160.5	28.6	15.2	10.1	0.236	4.8
Viga (NCF) Lado 3	4	201.0	28.8	17.1	13.3	0.228	9.6

Tabla 7: Resumen de Propiedades Mecánicas en Tensión en Dirección de Y del Material Reforzado con NCF.

Muestra	Número de Muestras	σ_y^t		E_y^t		ν_{yx}^t	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
Placa Superior A	5	---	---	17.7	1.8	0.252	0.6
Placa Superior B	5	---	---	21.5	1.7	---	---
Placa Inferior A	5	300.7	6.7	16.3	2.7	0.380	3.9
Placa Inferior B	6	393.1	7.4	22.7	4.2	0.236	4.7
Viga (NCF) Lado 1	5	244.2	10.6	18.6	2.4	0.328	12.6
Viga (NCF) Lado 2	5	232.4	15.4	18.2	3.4	0.282	18.1
Viga (NCF) Lado 3	5	60.7	21.4	13.1	12.8	0.123	1.7

Tabla 8: Resumen de Propiedades Mecánicas en Compresión en Dirección de X del Material Reforzado con NCF.

Muestra	Número de Muestras	σ_x^c		E_x^c		ν_{xy}^c	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
Placa Superior A	5	---	---	15.5	0.7	0.200	9.2
Placa Superior B	5	---	---	18.5	1.6	---	---
Placa Inferior A	5	253.4	4.1	13.8	7.4	0.242	26.1
Placa Inferior B	6	---	---	---	---	---	---
Viga (NCF) Lado 1	5	265.5	7.1	12.4	5.9	0.226	5.6
Viga (NCF) Lado 2	5	264.0	13.0	13.6	6.5	0.228	4.0
Viga (NCF) Lado 3	5	264.4	8.2	14.6	18.4	0.216	11.5

Tabla 9: Resumen de Propiedades Mecánicas en Compresión en Dirección de Y del Material Reforzado con NCF.

Muestra	Número de Muestras	σ_y^c		E_y^c		ν_{yx}^c	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
Placa Superior A	5	---	---	17.7	2.5	0.259	0.8
Placa Superior B	5	---	---	21.5	3.0	---	---
Placa Inferior A	5	312.5	5.0	17.3	3.3	0.327	1.3
Placa Inferior B	---	---	---	---	---	---	---
Viga (NCF) Lado 1	5	349.3	2.7	17.8	5.0	0.272	1.8
Viga (NCF) Lado 2	5	342.6	6.9	18.9	13.2	0.308	9.9
Viga (NCF) Lado 3	5	170.7	7.4	12.4	13.1	0.112	10.4

Las Tablas 10 a 12 presentan el resumen de las propiedades obtenidas el material de las vigas triangulares reforzadas

con el trenzado 3-D. En las tablas se incluyen el número de muestras ensayadas, los valores promedios de las propiedades junto con los coeficientes de variación (CV). El módulo de elasticidad de este material fue estimado de forma distinta a lo que establecen las normas de ASTM. Debido a la no-linealidad del material, el módulo se definió por la tangente inicial de la curva de esfuerzo-deformación. Se estimó realizando una adaptación de curva de la expresión de segundo orden

$$\sigma(\varepsilon) = C\varepsilon^2 + B\varepsilon \quad (1)$$

En esta ecuación, σ y ε corresponden al esfuerzo y a la deformación respectivamente tanto en la dirección de X como en Y. El módulo elástico se definió como la pendiente de esta curva expresado como

$$E(\varepsilon) = \frac{d}{d\varepsilon} \sigma(\varepsilon) = 2C\varepsilon + B \quad (2)$$

Fijando $\varepsilon = 0$ en la Ecuación (2) se determinó el módulo $E = B$. El mismo procedimiento se utilizó para determinar la razón de Poisson. Comparando el modo de falla de este material con el anterior (reforzado con NCF), éste no fue explosivo ni se delaminó como se anticipó debido a la estructura tridimensional. Se observaron grietas superficiales paralelas a la dirección de la carga y fibras arrancadas.

Tabla 10: Resumen de las Propiedades en Tensión en Dirección de X de las Vigas Reforzadas con el Trenzado 3-D

Ancho de Muestra	Número de Muestras	σ_x^t		E_x^t		ν_{xy}^t	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
25 mm	6	133.3	27.2	13.8	16.9	---	---
32 mm	10	130.2	17.7	12.7	19.1	0.123	19.9
51 mm	9	124.1	11.5	12.4	7.5	---	---

Tabla 11: Resumen de las Propiedades en Tensión en Dirección de Y de las Vigas Reforzadas con el Trenzado 3-D

Largo del Sensor mm	Número de Muestras	σ_y^t		E_y^t		ν_{yx}^t	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
6	10	66.9	18.4	22.4	24.6	0.298	40.4
11	3	72.7	6.1	29.2	9.2	---	---

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Tabla 12: Resumen de las Propiedades en Compresión de las Vigas Reforzadas con el Trenzado 3-D.

Dirección	Número de Muestras	Capacidad		Módulo		Razón de Poisson	
		Promedio MPa	CV %	Promedio GPa	CV %	Promedio	CV %
x	10	151.0	8.3	15.3 13.6 ³	24.4 8.1	0.192	38.0
y	10	74.4	10.0	15.4	10.5	0.139	19.2

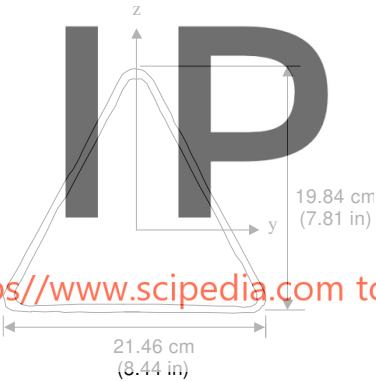
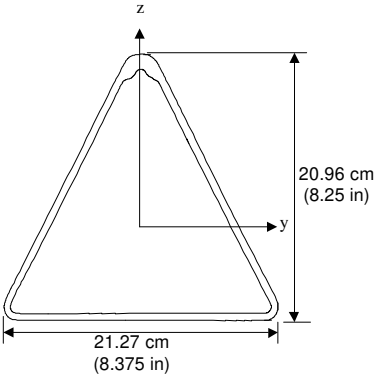
Comparando la capacidad y el módulo de elasticidad de los cupones de las vigas ensayados en tensión se pueden obtener varias observaciones. En la dirección de X ambos resultados son mayores para el material reforzado con NCF. Sin embargo, en la dirección de Y encontramos que la capacidad es mayor para el material reforzado con NCF y el módulo de elasticidad es mayor para el material reforzado con el trenzado 3-D. Para estos componentes se requiere tener un módulo mayor en la dirección de Y ya que estos podrán fallar por pandeo debido a los esfuerzos en compresión justo debajo de las cargas en la losa.

3 Dos muestras fueron eliminadas siguiendo los procedimientos de la norma ASTM E 178.

PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE VIGAS TRIANGULARES

Las propiedades estructurales de vigas con sección triangular se determinaron mediante ensayos en flexión aplicando las cargas en tres y cuatro puntos. Además, se midió exitosamente la rotación y traslación horizontal de las vigas durante el ensayo, las cuales pudieron producirse por errores de manufactura. La carga y los modos de falla no fueron determinados debido a que se querían mantener los especímenes intactos para realizar otras pruebas con el material. Se ensayaron cinco vigas triangulares, de las cuales dos estaban reforzadas con NCF y tres con el trenzado 3-D. La Tabla 13 muestra las propiedades de las secciones estimadas por medio de un dibujo digitalizado. La Tabla 14 muestra la matriz de pruebas de estas vigas. Las secciones se ensayaron con diferentes largos entre soportes con la sección orientada en posición derecha e invertida como se muestra en la tabla. La Figura 6 muestra una fotografía de la configuración del ensayo de una de las vigas. Las deflexiones fueron medidas mediante potenciómetros y las deformaciones fueron medidas mediante medidores de deformaciones localizados en distintos puntos a lo largo y alrededor de la sección. Las cargas fueron medidas con una celda de carga. Se creó un aditamento para acomodar la sección triangular y poder apoyar o cargar las vigas. El gato de carga estaba soportado por un simulador de carga gravitacional. La posible rotación y traslación horizontal durante la prueba fueron determinadas utilizando un arreglo de tres potenciómetros, dos verticales y uno horizontal. La descripción del método para calcular las deflexiones y rotación están incluidas en el Apéndice I. Además, se utilizó un inclinómetro para corroborar los cálculos de rotación. Para mas detalles sobre la instrumentación individual de cada espécimen refiérase a Acosta (1999).

Tabla 13: Propiedades Geométricas de las Vigas Triangulares

Refuerzo	Sección	Nombre	A_x cm ²	I_y cm ⁴	Largo m
NCF		STA	36.84	1,707	3.05
		STB			2.95
Trenzado 3-D		BTA	38.71	1,956	3.05
		BTB			3.05
		BTC			3.35

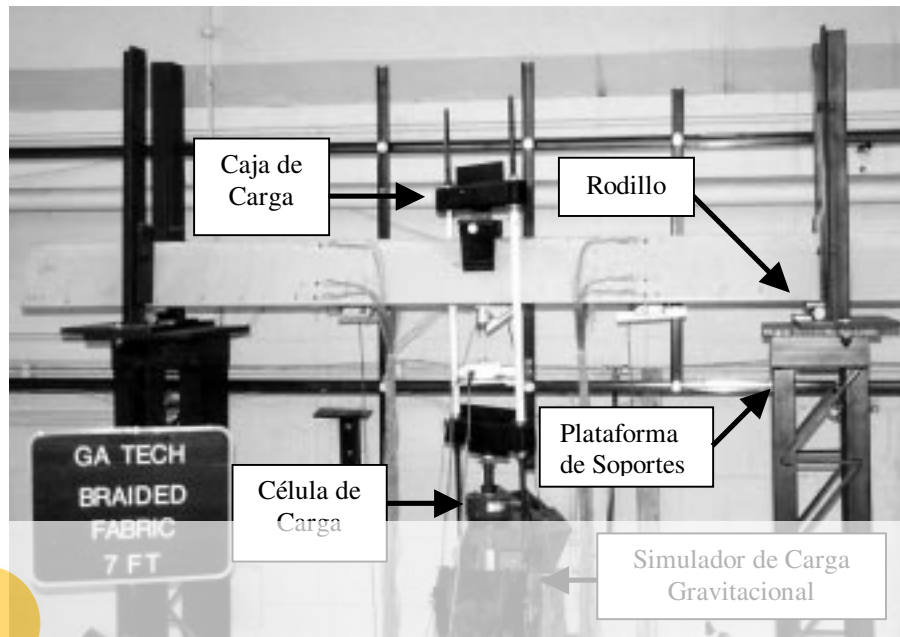




Figura 6: Ejemplo de la Configuración del Ensayo en Cargado en Tres Puntos

Tabla 14: Matriz de Prueba de las Vigas de Sección Triangular.

Viga	Condición de Carga		Posición de la Sección		Distancia Entre Apoyos, m			
	3-Puntos	4-Puntos	 Derecha	 Invertida	1.52	2.13	2.74	3.35
STA	*	*	*	*	*	*	*	*
STB		*	*		*	*	*	
BTA	*		*		*	*	*	
BTB	*		*	*	*	*	*	
BTC	*		*	*	*	*	*	*
		*	*	*				*

En la Figura 7 se muestra una gráfica de rotación-carga aplicada de los elementos BTB y STB. De la gráfica se puede apreciar la calidad de las vigas manufacturadas por el método de pultrusión comparadas con las manufacturadas a mano. Se puede ver claramente que la rotación del elemento STB fue principalmente debido a una desviación torsional inicial, que luego de alcanzar la carga de 4 kN, se acomodó completamente en los apoyos donde dejó de rotar. La rotación del elemento BTB se puede despreciar pues se considera que se debe a variaciones en las lecturas de los instrumentos, por ser valores muy pequeños.

4 Largo actual fué 1.83 m

5 Largo actual fué 2.29 m

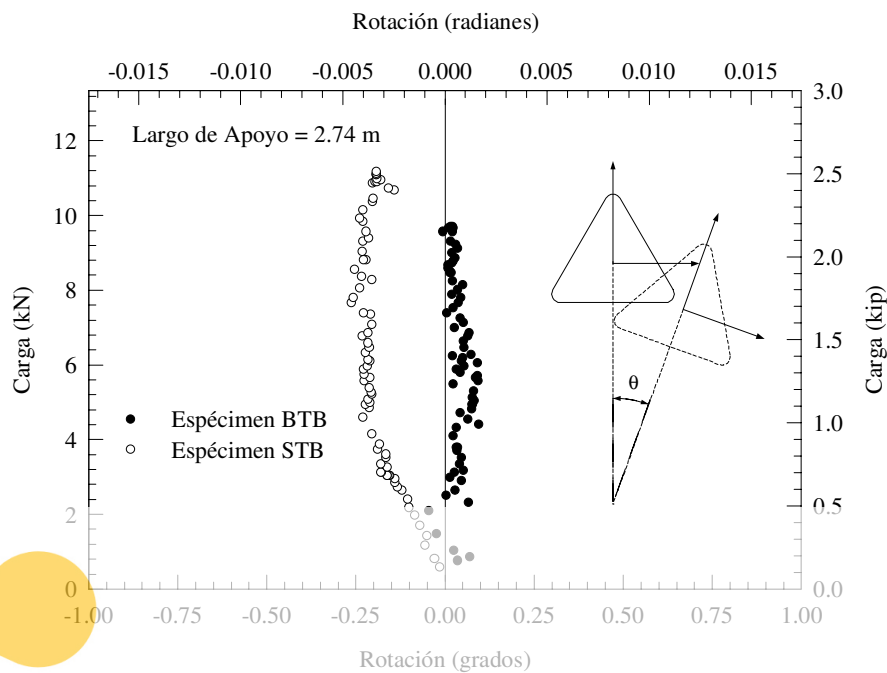


Figura 7: Gráfica de Carga-Rotación de las Vigas BTB y STB

De las lecturas de carga y deflexiones verticales se calculó el módulo de elasticidad aparente ($E_{a,x}$). Se le llamó al módulo de elasticidad “aparente” porque no se consideró la contribución a la deformación por el cortante. Se utilizaron las expresiones de la deflexión para vigas simplemente apoyadas cargadas al centro y a una distancia $L/3$ de ambos apoyos, de las cuales se despejó el módulo, obteniéndose las siguientes expresiones:

$$E_{a,x} = \frac{P}{\delta_c} \frac{L^3}{48 I_y} \quad (3)$$

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

$$E_{a,x} = \frac{P}{\delta_c} \frac{23 L^3}{1296 I_y} \quad (4)$$

donde P es la carga aplicada, δ_c es la deflexión al centro de la viga, L es el largo entre soportes y I_y es el momento de inercia de la sección.

Los promedios de los módulos aparentes de las secciones se han resumidos en las Tablas 15 y 16. En los resultados de las tablas se puede notar que a medida que el largo entre apoyos disminuye, también lo hace el módulo. Esto es debido a que la contribución de la deformación de cortante es mayor para largos de apoyo cortos. Medidas semejantes fueron hechas utilizando las lecturas de deformaciones pero no son presentadas en este artículo por ser valores semejantes al módulo del largo entre apoyo mayor presentado en las tablas. El comportamiento fue lineal en el rango de la carga aplicada como se muestra en la Figura 8. La diferencia entre la carga y descarga se debe a que se utilizaron cojincillos de goma (rubber pads) para proteger las vigas en el área de carga y soportes. Su efecto es mas notable en las pruebas con espacio entre apoyo cortos.

Tabla 15: Módulo Elástico Aparente de las Vigas de Sección Triangular – Cargada en Tres Puntos.

Distancia Entre Apoyos m	STB GPa	BTA GPa	BTB (Derecha) GPa	BTB (Invertida) GPa	BTC (Derecha) GPa	BTC (Invertida) GPa
1.52	10.7	9.7	13.0	13.2	12.0	12.2
2.13	12.8	11.5	15.0	16.2	14.6	14.6
2.74	14.4	12.8	16.3	16.8	15.6	15.5
3.35	---	---	---	---	16.4	16.0

Tabla 16: Módulo Elástico Aparente de las Vigas de Sección Triangular – Cargada en Cuatro Puntos.

Distancia Entre Apoyos - STA m	$E_{a,x}$ - STA GPa	Distancia Entre Apoyos - STB m	$E_{a,x}$ - STB GPa	Distancia Entre Apoyos - BTC m	$E_{a,x}$ - BTC GPa
1.83	11.1	1.52	10.6	1.52	---
2.29	12.7	2.13	12.6	2.13	---
2.74	14.1	2.74	14.7	2.74	---
3.35	---	3.35	---	3.35	17.1

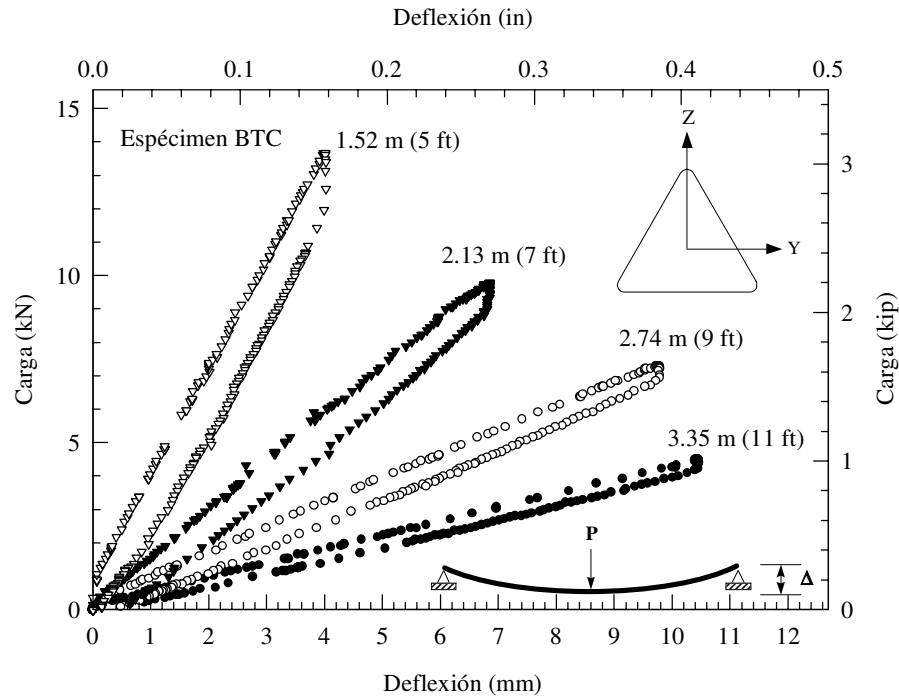


Figura 8: Gráfica Típica de Carga y Descarga vs. Deflexión al Centro de Viga Reforzada con el Trenzado 3-D.

Para tratar de aislar el módulo en flexión del módulo de cortante en las pruebas de las vigas, se utilizó el procedimiento establecido por Sims (1987) y Bank (1989) el cuál fue desarrollado basado en la teoría de vigas de Timoshenko. En este trabajo se definió el término de rigidez en flexión ($D_x^b = E_{b,x}I_y$) y rigidez en cortante ($Q_{xz}^b = kA_xG_{b,xz}$) para evitar cualquier error en los cálculos de las propiedades de las secciones. Se partió de las ecuaciones de deflexión al centro de una viga cargadas en tres y cuatro puntos las cuales son respectivamente:

$$\delta_c^{3p} = \frac{PL^3}{48D_x^b} + \frac{PL}{4Q_{xz}^b} \quad (5)$$

$$\delta_c^{4p} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{D_x^b} + \frac{PL}{6Q_{xz}^b} \quad (6)$$

Estas ecuaciones se pueden reconfigurar de la siguiente forma:

$$\alpha_c^{3p} = \frac{1}{48D_x^b} L^2 + \frac{1}{4Q_{xz}^b} \quad (7)$$

$$\alpha_c^{4p} = \frac{23}{1296} \frac{1}{D_x^b} L^2 + \frac{1}{6Q_{xz}^b} \quad (8)$$

donde $\alpha_c^{3p} = \frac{\delta_c^{3p}}{PL}$ y $\alpha_c^{4p} = \frac{\delta_c^{4p}}{PL}$. Las ecuaciones (7) y (8) representan líneas rectas donde la intersección en el eje vertical y la pendiente están relacionadas a las rigideces en flexión y cortante. La variable independiente es (L^2) y la variables dependientes son α_c^{3p} y α_c^{4p} . La Figura 9 muestra un ejemplo del método utilizando la viga BTC. Los puntos de la curva se obtienen de los ensayos de la misma viga con diferentes largos entre soportes. Para minimizar errores se recomienda utilizar al menos tres puntos. En otras palabras, ensayar la misma viga a tres distintos largos entre soportes. Los resultados obtenidos están resumidos en la Tabla 17. La tabla también presenta los resultados obtenidos por el método anterior basado en las ecuaciones (3) y (4) para viga simple sin considerar deformación de cortante. De la Tabla 17 se puede observar que los valores de D_x^b calculados sin considerar cortante para la distancia entre soportes más larga constituyen aproximadamente el 90% del valor calculado por el método presentado. Esto significa que si se ensayan vigas con una razón de $L/h \geq 5.5$ la rigidez en flexión tendrá un error de no mas del 10%. Por otro lado, los valores de Q_{xz}^b presentan resultados muy por debajo de lo que podría ser la rigidez de cortante de este material. Por ejemplo, multiplicando el módulo de cortante del material reforzado con el trenzado 3-D (3.4 GPa) por el área del elemento (0.0039 m^2) suponiendo de $k = 1$ provee $Q_{xz}^b = 13,400 \text{ kPa-m}^4$ el cuál es aproximadamente tres veces mayor que los valores obtenidos. Bank (1989) obtuvo resultados similares llevándolo a la conclusión de que cada sección tendría un valor propio de Q_{xz}^b a pesar de ser del mismo material. En este estudio no hay suficiente evidencia experimental para llegar a semejante conclusión pero si se puede argumentar que es posible que la formulación de Q_{xz}^b sea mucho más sensitiva que D_x^b bajo estimando la rigidez de cortante de estos elementos.

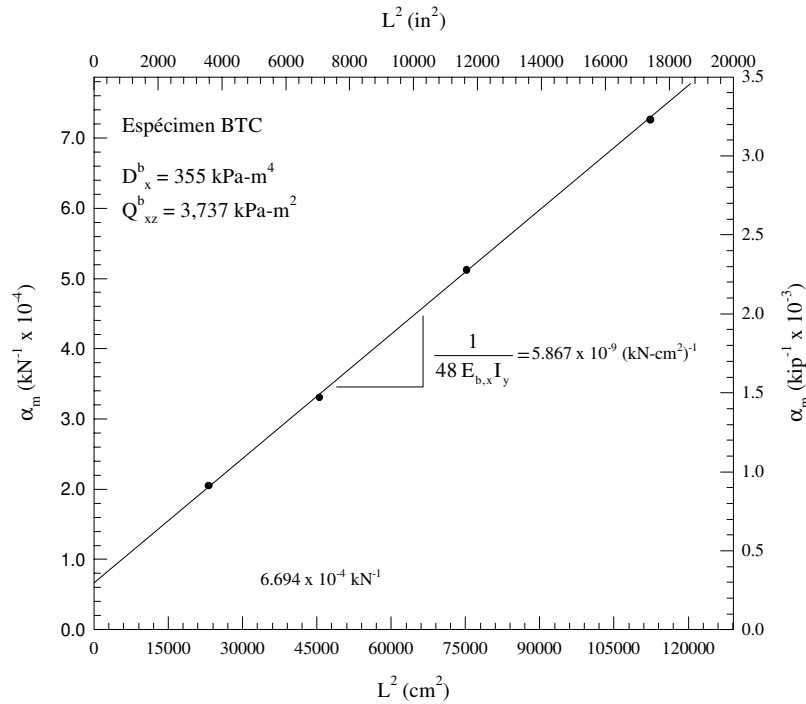


Figura 9: Regresión Lineal para Medir Simultáneamente la Rigidez en Flexión D_x^b y la Rigidez de Cortante Q_{xz}^b de la Viga BTC.

PROPIEDADES ESTRUCTURALES DE PROTOTIPOS DE LOSAS

Un total de cuatro especímenes a escala real de la losa para puentes fueron ensayados en flexión. La Tabla 18 muestra un resumen de las características físicas de los especímenes. La Figura 10 muestra la orientación del refuerzo para cada componente de la losa con respecto a los ejes globales X-Y-Z. Estos ejes corresponden a las direcciones de los dos tipos de refuerzos discutidos en una sección anterior. Hay que notar que para las placas superior e inferior el eje fuerte del refuerzo está orientado paralelo al eje global de X mientras que para las vigas de sección triangular el eje fuerte del refuerzo está orientado en la dirección circunferencial. Esto se debe a que las vigas no tan solo están sujetas a esfuerzos en flexión si no que también están sujetas a compresión en la dirección global de Z, lo cual las hace propensas a pandeo fuera del plano de flexión. Los especímenes se ensayaron simplemente apoyados, con la carga aplicada al centro, como se muestra en la Figura 11.

Tabla 17: Módulos Flectores y de Cortante Calculados Utilizando el Método de Pendiente-Intercepto.

Condición de Carga	Viga	Análisis Presentado		Viga Simple	
		D^b_x kPa-m ⁴	Q^b_{xz} kPa-m ²	D^b_x kPa-m ⁴	Distancia Entre Apoyos m
3 Puntos	STB	286	2,331	240	2.74
	BTA	296	2,713	253	2.74
	BTB-D	363	4,381	321	2.74
	BTB-I	375	4,737	331	2.74
	BTC-D	355	3,737	323	3.35
	BTC-I	341	4,510	315	3.35
4 Puntos	STA	294	1,446	235	2.74
	STB	300	1,615	246	2.74

Tabla 18: Resumen de los Especímenes de las Losas de PRF.

Especimen	Largo m	Peso por Area Unitaria kN/m ²	Refuerzo en Superficies Exteriores	Refuerzo de Vigas con Sección Triangular	Adhesivo
1	3.05	1.24	NCF – Grupo A	NCF	Trevira
2	3.05	0.96	NCF – Grupo A	NCF	Plexus
3	3.05	1.24	NCF – Grupo A	NCF	Trevira
4	3.66	1.10	NCF – Grupo B	Trenzado 3-D	Pliogrip ⁶

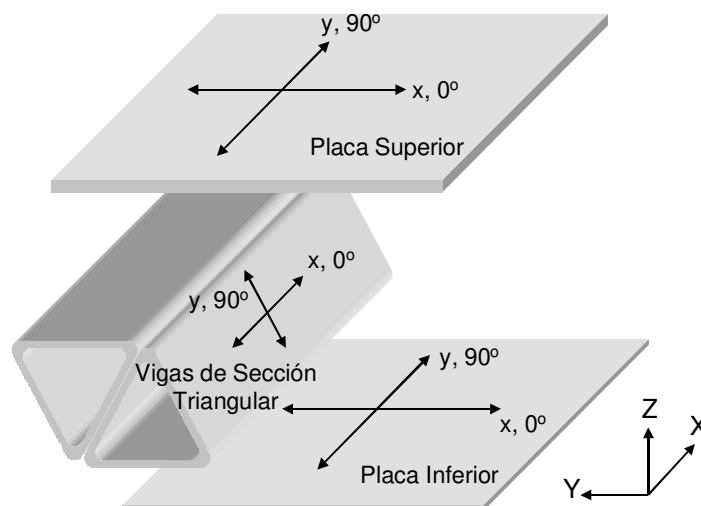


Figura 10: Orientación de las Fibras de Refuerzo en los Especímenes de Losas de Puentes.

Se midieron deflexiones y deformaciones en la dirección longitudinal al centro del espécimen como se muestra en la figura. La Tabla 19 muestra el tamaño del área donde se aplicó la carga y su correspondiente largo entre apoyos para cada uno de los especímenes. Especímenes 1 y 2 no fueron fallados. Estos fueron sujetos a una carga máxima de 53 kN obteniendo deflexiones de 7.6 mm para el espécimen 1 y 8.9 mm para el espécimen 2. El espécimen 3 fue cargado hasta 396 kN, y para esa carga se escucharon sonidos de agrietamiento. Al examinar el espécimen luego de haberse cargado se notaron fallas en el adhesivo en los bordes de la placa inferior. Además, al descargarlo, se observó daño permanente en el mismo. Por último, el espécimen 4 fue cargado hasta llegar a falla. La carga máxima fue de 427 kN produciendo una deflexión de 72.1 mm. La Figura 12 muestra la gráfica de carga-deflexión del espécimen 4. Este espécimen falló al

centro, mostrando rompimiento por tensión y delaminación en la placa inferior y fallas en tensión en las vigas de sección triangular. No se observaron daños en la placa superior. Podemos decir que el comportamiento fue lineal hasta el 75% de la carga ultima. La poca no-linealidad observada pudo haber sido causada por la formación de micro grietas en el material y en la interfase de los componentes.

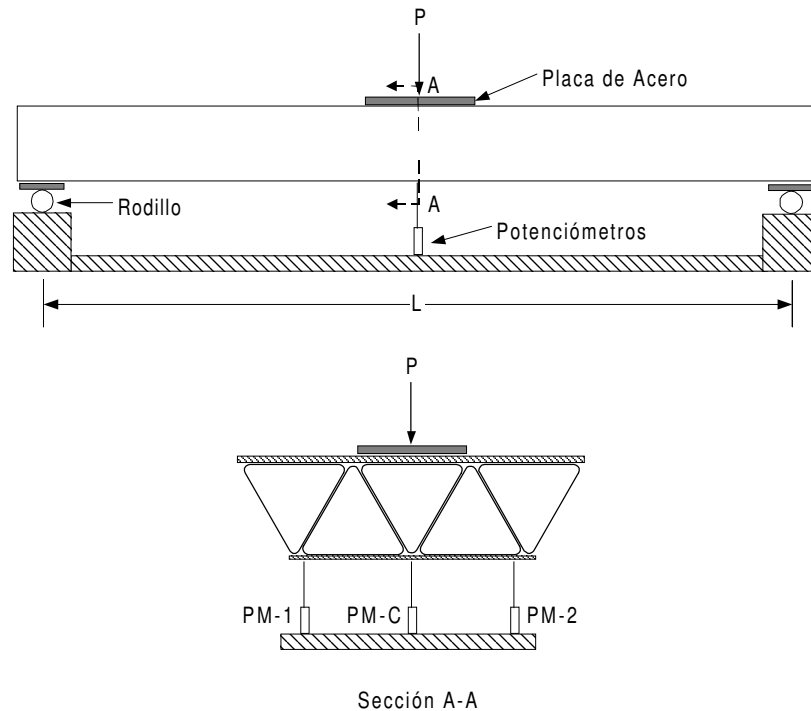


Figura 11: Esquema de la Configuración del Ensayo en Flexión de los Especímenes de las Losas.

Tabla 19: Tamaños de Carga y Distancia Entre Apoyos Utilizados en los Ensayos de las Losas de PRF.

Especímen	Tamaño de Carga (cm) x (cm)	Distancia Entre Apoyos M
1	20.3 x 20.3	2.87
2	20.3 x 20.3	2.87
3	25.4 x 25.4	2.95
4	20.3 x 50.8	3.05

La Tabla 20 muestra el resumen de las rigideces de flexión, $D_{xx} = \frac{E_{a,x} I_y}{w_d}$, que fueron determinadas para cada uno de los especímenes ensayados. Esta expresión se derivó de la teoría de vigas simples como sigue:

$$D_{xx} = \frac{P}{\delta_c} \frac{L^3}{48w_d} \quad (9)$$

donde $\frac{P}{\delta_c}$ proviene de la pendiente del diagrama de fuerza-desplazamiento, w_d es el ancho promedio del espécimen (0.66 m), y L es la distancia entre apoyos. De la tabla se puede notar que los especímenes 3 y 4 tienen una rigidez mayor que los especímenes 1 y 2. Para el diseño final se utilizó como modelo el espécimen 4 por varias razones. Su peso por área unitaria es menor que el del espécimen 3. La utilización del trenzado 3-D provee una rigidez mayor en la dirección circunferencial (eje Y) de las vigas de sección triangular, aumentando la capacidad al pandeo. Por ultimo, el método de pultrusión utilizado para manufacturar las vigas provee secciones con errores geométricos despreciables, las cuales producirán una losa uniforme con mínimo desnivel.

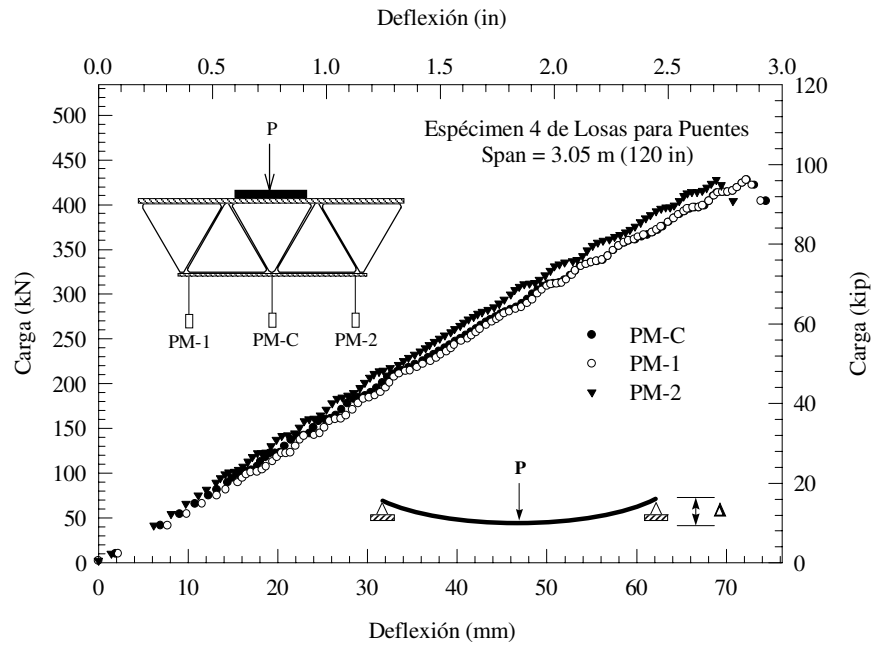
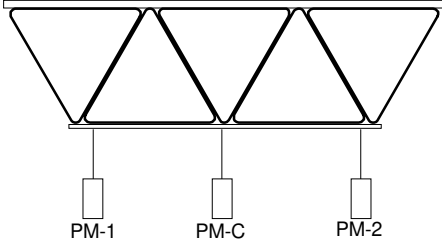


Figura 12: Gráfica Experimental de Carga-Deflexión del Espécimen 4 de las Losas de Puente.

Tabla 20: Rigidez en Flexión por Unidad de Ancho (D_{xx}) de los Especímenes de Losas Para Puente.

								
Units: D_{xx} (kN-m ² /m), $\frac{P}{\delta_c}$ (kN/m)								
Lugar	Especimen 1		Especimen 2		Especimen 3		Especimen 4	
	$\frac{P}{\delta_c}$	D_{xx}	$\frac{P}{\delta_c}$	D_{xx}	$\frac{P}{\delta_c}$	D_{xx}	$\frac{P}{\delta_c}$	D_{xx}
PM-1	6,773	5,055	5,426	4,048	8,206	6,622	6,485	5,793
PM-C	6,816	5,083	5,703	4,253	8,571	6,916	6,451	5,763
PM-2	6,788	5,064	6,151	4,588	8,052	6,367	6,732	6,013

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la determinación experimental de las propiedades mecánicas de varios prototipos de losas para puentes hechas con Polímeros Reforzados con Fibras (PRF). Se investigaron las propiedades a nivel de cupones, vigas de sección triangular a escala real y especímenes de la losa de puentes. De este trabajo se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se encontró mayor variabilidad en el material reforzado con el trenzado 3-D la cuál pudo haber sido provocado por procedimientos de prueba. Se recomienda hacer un estudio más detallado donde al menos 30 muestras sean incluidas para obtener valores estadísticos mas confiables.
- Ambos refuerzos utilizados, NCF y trenzado 3-D, son adecuados para este tipo de aplicación. Lo mas importante es la calidad de manufactura ya que garantiza que las propiedades del material sean uniformes y que

- el producto final tenga menos imperfecciones.
- Es posible medir las propiedades del material ensayando cupones en vez de crear ensayos complejos como los de flexión en tres y cuatro puntos. Las diferencias en resultados se originaron por las aproximaciones hechas en los cálculos de las propiedades seccionales.
- El diseño de losas para puentes hechas de PRF está dominado por flexibilidad y no por la carga última, pues los especímenes sometidos a falla resistieron aproximadamente 5.5 veces la carga de diseño.
- El espécimen 4, formado por placas planas reforzadas con NCF y vigas triangulares reforzadas con trenzado 3-D, fue escogido como el mejor debido a que su peso es 13% menor que el del espécimen 3, las vigas triangulares tienen mayor capacidad en la dirección fuera del plano de flexión y tiene menos defectos geométricos.
- Se recomienda que se desarrollen metodologías de diseño donde se calibren los modelos de diseño con datos experimentales y valores de variabilidad en el material utilizando metodologías de confiabilidad.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a la compañía Atlantic Research Corporation por la ayuda financiera para llevar a cabo este trabajo. El primer autor agradece el apoyo recibido del Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez.

APÉNDICE I. CÁLCULOS DE ROTACIÓN Y DESPLAZAMIENTO

La rotación y los desplazamientos verticales y laterales de las vigas de sección triangular fueron estimados utilizando el arreglo de potenciómetros mostrado en la Figura 13. Información más detallada de este procedimiento fue publicada en el reporte de Acosta (1999). Los desplazamientos y la rotación mostradas en la figura representan movimientos positivos.

Los sensores A y B (P-A y P-B) se encuentran inicialmente en posición vertical mientras que el sensor C (P-C) está en posición horizontal. El proceso a seguir es el siguiente. Primero se determina los desplazamientos D_y y D_z en el punto donde P-B y P-C se intersecan. La expresión relaciona los largos iniciales y finales de la cuerda que une los instrumentos. Se parte de un sistema de ecuaciones simultáneas de dos círculos que se intersecan:

$$\begin{aligned} B_f^2 &= D_y^2 + (B_o - D_z)^2 \\ C_f^2 &= D_z^2 + (C_o - D_y)^2 \end{aligned} \quad (I-1)$$

donde B_o y C_o son los largos iniciales y B_f y C_f son los largos finales de las cuerdas atadas a los instrumentos. La solución de la Ecuación (I-1) genera dos pares de soluciones, donde una solución es físicamente posible. Segundo se determina la rotación (θ) de la sección utilizando los valores ya encontrados anteriormente y los largos iniciales (A_o) y finales (A_f) de la cuerda conectada a P-A. La expresión es la siguiente:

$$A_f^2 = [D_y + b(1 - \cos \theta)]^2 + [A_o - D_z + b \sin \theta]^2 \quad (I-2)$$

donde b es la distancia entre el punto de conexión de P-A y P-B. La Ecuación (I-2) es resuelta por θ resultando en dos soluciones. Nuevamente la solución correcta es aquella físicamente posible.

Finalmente, las deflexiones en el centroide geométrico de la sección (Δ_y y Δ_z) se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \Delta_y &= D_y + \frac{b}{2}(1 - \cos \theta) + h_p \sin \theta \\ \Delta_z &= D_z + h_p(1 - \cos \theta) - \frac{b}{2} \sin \theta \end{aligned} \quad (I-3)$$

donde h_p es la distancia vertical entre la base y el centroide geométrico de la sección.

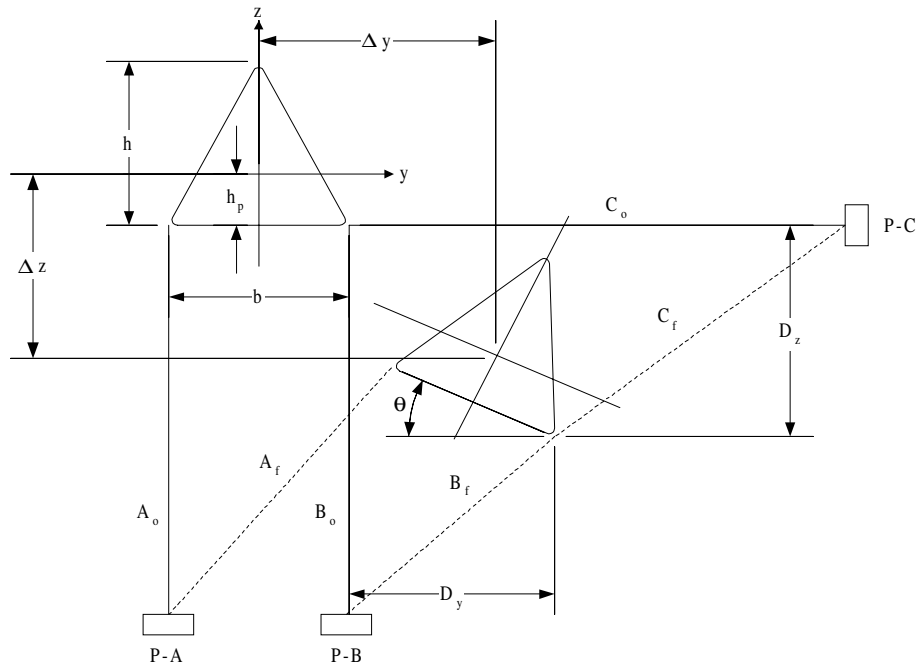


Figura 13: Arreglo de los Potenci6metros para Calcular Desplazamientos Verticales y Horizontales y Rotaci6n de las Vigas.

AP6NDICE II. NOTACI6N

A_x	6rea seccional
B, C	Constantes
D_{xx}, D_x^b	Rigidez en flexi6n
$E_{a,x}, E_{b,x}$	M6dulo en flexi6n de un elemento estructural
E_x, E_y, E	M6dulo de elasticidad axial
I_y	Momento de inercia de secci6n
k	Coefficiente de cortante
L	Distancia entre soportes
P	Carga concentrada
Q_{xz}^b	Rigidez en cortante
w_d	Ancho promedio
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma$	Esfuerzos axiales m6ximos
ν_{xy}, ν_{yx}	Razi6n de Poisson
ϵ	Deformaci6n
$\delta_c, \delta_c^{3p}, \delta_c^{4p}$	Deflexi6n al centro de la distancia entre apoyos

REFERENCIAS

- ASTM (1994). "Standard Practice for Dealing with Outlying Observations", ASTM E 178-94, Philadelphia, PA.
- ASTM (1991). "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement". ASTM D 792-91, Philadelphia, PA.
- ASTM (1995). "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials". ASTM D 3039/D 3039M-95a, Philadelphia, PA.
- ASTM (1976). "Standard Test Method for Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion". ASTM D 3171-76, Philadelphia, PA.
- ASTM (1995). "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading". ASTM D 3410/D 3410M-95, Philadelphia, PA.

- Acosta, F. J. (1999). *Experimental Characterization of the Mechanical and Structural Properties of Fiber Reinforced Polymeric Bridge Deck Components*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Bank, L. C. (1989). "Flexural and Shear Moduli of Full-Section Fiber Reinforced Plastic (FRP) Pultruded Beams". *Journal of Testing and Evaluation*, 17(1), pp. 40-45.
- Bettigole, N. H. (1990). "Replacing Bridge Decks", *Civil Engineering*, 6(9), pp. 76-77.
- Brown, R. T., y Crow, E. C. (1992). "Automatic Through-the-Thickness Braiding". *37th International SAMPE Symposium*, pp. 832-842.
- Hogg, P. J. y Woolstencroft, D. H. (1991). "Non-Crimp Thermoplastic Composite Fabrics: Aerospace Solutions to Automotive Problems". *Seventh Annual ASM/ESD Advanced Composites Conference*, Detroit, pp. 339-349.
- Hörsting, K., Wulhorst, B., Franzke, G. y Offermann, P. (1993). "New types of Textile Fabrics for Fiber Composites". *SAMPE Journal*, 29(1), pp.7-12.
- Karbhari, V. M., Seible, F., Hegemier, G. A. y Zhao, L. (1997). "Fiber Reinforced Composite Decks for Infrastructure Renewal-Results and Issues". *Proceedings of the International Composites Expo '97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp. 3-C(1-6).
- López-Anido, R. y GangaRao, H. V. S. (1997). "Design and Construction of Composite Material Bridges". *Recent Advances in Bridge Engineering*, U. Meier y R. Betti (Eds), pp. 269-276.
- López-Anido, R., GangaRao, H. V. S., Vedam, V. y Overby, N. (1997a). "Design and Evaluation of a Modular FRP Bridge Deck". *Proceedings of the International Composites Expo '97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp. 3-E(1-6).
- López-Anido, R., GangaRao, H. V. S., Trovillion, J. y Busel, J. (1997b). "Development and Demonstration of a Modular FRP Deck for Bridge Construction and Replacement". *Proceedings of the International Composites Expo '97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp.16-D(1-6).
- Masters, J. E. y Potanova, M. A. (1996). Standard Test Methods for Textile Composites. NASA Contractor Report 4751.
- Shih, B. J. (1995). *On the Analysis of Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Components*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Sims, G. D., Johnson, A. F. y Hill, R. D. (1987). "Mechanical and Structural Properties of a GRP Pultruded Section". *Composite Structures*, 8, pp. 173-187.
- Stoddard, W. P. (1997). *Lateral-Torsional Buckling Behavior of Polymer Composite I-Shaped Members*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Ye, B. S., Svenson, A. L. y Bank, L. C. (1995). "Mass and Volume Fraction Properties of Pultruded Glass Fibre-Reinforced Composites". *Composites*, 26(10), pp. 725-731.
- Zureick, A. H., Shih, B. y Munley, E. (1995). "Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Decks". *Structural Engineering Review*, 7(3), pp. 257-266.